

isotopen-archeologie

de toekomst van het verleden met een toegepaste natuurwetenschap

Rede uitgesproken door

Prof. dr. ir. J. van der Plicht

bij het aanvaarden van het ambt van bijzonder hoogleraar
in de isotopen-archeologie,
aan de Universiteit Leiden,
vanwege de Stichting Leids Universiteits Fonds,
op vrijdag 7 oktober 2005.

Mijnheer de Rector Magnificus,
Leden van het bestuur van het Leids Universiteits Fonds,
Leden van het Curatorium van deze Bijzondere Leerstoel,
Zeer gewaardeerde toehoorders,

Isotopen zijn overal, dat hoop ik u in deze voordracht duidelijk te kunnen maken. Deze eigenschap wordt gedeeld met de archeologie: ook het verleden is overal, waar men een spade in de grond steekt. De combinatie van beide, isotopen en archeologie, levert dan ook een interessant stukje wetenschap op, en daar gaat het vandaag over: *isotopen-archeologie*. Een vakgebied dat thuishoort bij wat men wel "Archaeological Sciences" noemt: toepassingen van de natuurwetenschappen in de archeologie.

isotopen en dateren

Bij isotopen denkt men in het algemeen in de eerste plaats aan radioactiviteit; niet alleen het algemene publiek, maar ook in de archeologie. De oorzaak ligt voor de hand - het isotoop koolstof-14 (^{14}C), bijvoorbeeld, is radioactief, en is voor de archeologie van groot belang doordat het radioactief verval kan worden gebruikt als een soort klok voor het meten van ouderdommen: de ^{14}C -dateringsmethode. Maar er zijn ook niet-radioactieve isotopen, ook van koolstof: bijvoorbeeld koolstof-13 (^{13}C). Voor de archeologie is dit stabiele isotoop van belang omdat we daarmee onder andere de herkomst van materialen kunnen karakteriseren.

Wat zijn isotopen: de elementen zoals ze in de natuur voorkomen kennen allemaal meerdere verschijningsvormen die isotopen worden genoemd. Isotopen staan - zoals (voor de klassiek geschoolden onder u) de naam al zegt - op dezelfde plek in het periodiek systeem der elementen en zijn chemisch niet te onderscheiden. Ze verschillen alleen in het aantal deeltjes waaruit hun atoomkern is opgebouwd. De hoofdrol in dit verhaal is voor het element koolstof, element nummer 6 in het periodiek systeem, en met dus 6 protonen (positief geladen deeltjes) in de atoomkern. Maar de kern bestaat daarnaast ook uit andere, ongeladen deeltjes, neutronen. Het aantal neutronen kan variëren, en bedraagt voor koolstof 6, 7, of 8. Van het element koolstof bestaan er dus drie verschillende isotopen in de natuur, met respectievelijk 12, 13 en 14 kerndeeltjes: ^{12}C , ^{13}C en ^{14}C . Dit zijn de drie isotopen van koolstof, met massa 12, 13 en 14. ^{12}C en ^{13}C zijn stabiel, en ^{14}C is radioactief.

Van alle koolstof die in de natuur voorkomt is ongeveer 99% ^{12}C , ongeveer 1% ^{13}C , en heel weinig ^{14}C . Hoe weinig: 1 op 10^{12} tot 1 op 10^{15} . Wat zegt dit laatste getal, een 1 gevolgd door 15 nullen? Dat kunnen we alleen aanvoelen met een voorbeeld: als we ervan uitgaan dat een mens gemiddeld 100.000 haren op zijn hoofd heeft, dan komt 1 op 10^{15} overeen met één haar op de totale wereldbevolking. Ja, inderdaad, die ene haar kunnen wij nog net aantonen met onze apparatuur.

Hoe gaat het meten van ouderdommen nu precies in zijn werk?

^{14}C wordt geproduceerd hoog in de atmosfeer, indirect door een reactie met deeltjes uit het heelal (de kosmische straling). Vervolgens begint het ^{14}C in de vorm van atmosferische CO_2 deel uit te maken van de koolstofkringloop. Door de fotosynthese, dat is het opnemen van het koolzuurgas CO_2 , komt het in de planten terecht, en vervolgens via het voedsel ook in mensen en dieren. Wij zijn dus allemaal een beetje radioactief...

Zodra een organisme sterft, houdt uiteraard de opname van CO_2 en dus ook van ^{14}C op. Door het radioactieve verval wordt vervolgens het percentage ^{14}C in het organisme vanaf dat moment steeds minder. Dit gebeurt met een karakteristieke tijdconstante, die halveringstijd wordt genoemd. Voor ^{14}C is deze 5730 jaar. Dit betekent dat 5730 jaar na het moment van de dood van een organisme, de helft van het oorspronkelijke, natuurlijke ^{14}C over is. Omgekeerd: als we in archeologische materialen de ^{14}C -concentratie meten en vinden dat deze half zo groot is als de natuurlijke waarde, dan weten we dat het organisme 5730 jaar geleden is overleden.

Zo kunnen we voorwerpen dateren tot 50.000 jaar geleden. De vervallende ^{14}C -kernen fungeren dus als een interne klok, doordat organische materialen (inclusief mens, plant en dier) van nature koolstof en dus ook ^{14}C bevatten. De klok (die de tijd in het verleden aangeeft) is af te lezen door het verrichten van een fysische meting.

Dat klinkt eenvoudig, maar helaas is het allemaal niet zo simpel als hier geschetst. Ten eerste is de ^{14}C -klok verstoord en tikt zij niet zoals het klokje thuis; in de tweede plaats is de ^{14}C -radioactiviteit niet gemakkelijk te meten, er komt heel wat voor kijken, tot deeltjesversnellers aan toe.

Ik wil eerst met u de verstoorde klokproblematiek behandelen.

Allereerst: fysische, chemische en biologische processen veranderen de concentraties van de zeldzame isotopen doordat deze processen doorgaans massa-afhankelijk zijn. Dit verschijnsel wordt fractionering genoemd, een technische term voor isotopen-discriminatie. Verschillende materialen hebben dus verschillende concentraties isotopen, afhankelijk van herkomst en dergelijke. Of ze stabiel dan wel radioactief zijn maakt hiervoor niet uit.

Het hout van deze kansel heeft dan ook minder zeldzame isotopen zoals ^{13}C en ^{14}C dan de atmosfeer waarin de boom groeide die het hout heeft geleverd. De oorzaak is gelegen in het fotosyntheseproces: dit verloopt moeizamer naarmate de massa van het CO_2 molecuul groter is. Een plant bevat dan ook minder ^{13}C en ^{14}C dan de atmosfeer waarin hij groeit - hij is dus verarmd. Minder ^{14}C , dat betekent voor onze tijdmeting: ouder, en een directe verstoring van onze klok.

Er bestaan plantensoorten met onderling geheel verschillende fotosyntheseprocessen, waardoor ze grote verschillen in zowel hun ^{13}C - als ^{14}C -gehalte hebben. Stel U laat in uw tuin beide planten naast elkaar opgroeien, dan blijkt de ene plantensoort qua ^{14}C

200 jaar ouder te zijn dan de andere¹. De arme archeoloog van de toekomst die over enkele eeuwen de "stratum postmodernicum" van uw tuin opgraaft kan zo gemakkelijk tot verkeerde conclusies komen, als er niet voor dit effect wordt gecorrigeerd. Gelukkig kunnen we dat.

Een andere complicatie is de aanname, dat de hoeveelheid ^{14}C in de atmosfeer niet verandert, en dus ook in de tijd dat het monster ontstaan is, dezelfde waarde had als nu. We weten inmiddels dat deze aanname onjuist is - in feite is dit ontdekt door de oprichter van het Groninger ^{14}C -laboratorium, Prof. de Vries, al in 1958². In die tijd werden er verschillen ontdekt tussen voorwerpen waarvan de ouderdom precies bekend was, en de ouderdom volgens de ^{14}C -methode. De oorzaak werd al gauw begrepen: veranderingen in de sterkte van het aardmagnetisch veld, en veranderingen in zonne-activiteit beïnvloeden de hoeveelheid kosmische straling die door onze planeet wordt ingevangen, en daarmee ook de productie van ^{14}C in de atmosfeer. Voeg hieraan toe onduidelijkheden over de juiste waarde van de halveringstijd van ^{14}C , en de verwarring is compleet.

De gevolgen van dit alles voor onze ^{14}C -klok zijn groot. De ^{14}C -klok loopt niet alleen uit de pas met de kalender (vanwege het gebruik van een niet geheel juiste halveringstijd); het tempo van de ^{14}C -klok verandert ook nog eens voortdurend (vanwege variaties in het natuurlijke ^{14}C -gehalte).

U moet zich voorstellen, u rijdt met constante snelheid (cruise control aan) over de snelweg. U bent uw horloge vergeten, en probeert nu aan de hand van de hectometerpaaltjes uw reistijd in de gaten te houden. U komt in de problemen omdat blijkt dat deze paaltjes door de aannemer om de 90 meter zijn geplaatst. Dit is het effect van een foute halveringstijd. Dat is nog niet alles: na de aanleg van de weg zijn er wat aardverschuivingen geweest. De weg is inmiddels gerepareerd, maar voor de paaltjes was er geen budget, met als gevolg dat de ene keer de onderlinge afstand tussen twee paaltjes 89 meter is geworden, de andere keer 93 meter, verderop weer wat anders, enzovoort. Dit is het effect van de variërende natuurlijke ^{14}C -concentratie.

In werkelijkheid geven de onderling verschillende afstanden van de paaltjes informatie - niet over aardverschuivingen, maar over veranderingen van de activiteit van de zon en daarmee ook van het klimaat³. Voor de archeologie is dit interessant omdat er een verband lijkt te bestaan tussen veranderende zonne-activiteit en dus de natuurlijke ^{14}C -concentratie, klimaatverandering en migraties in de prehistorie van vele landen, met name rond 800 v.Chr⁴.

ijken, getallen en versnellers

Met deze analogie kunt u ook begrijpen hoe we de onregelmatig tikkende ^{14}C -klok toch zinvol kunnen gebruiken. Immers, als we een kaart hebben waar al die paaltjes op staan is er geen probleem en kunnen we de zaak iken. Het iken kunnen we wat ^{14}C betreft doen met behulp van elkaar overlappende jaarring-patronen van bomen.

Hiermee kan hout worden gedateerd tot op het jaar nauwkeurig. Via deze dendrochronologie kunnen we een stuk hout verkrijgen van bijvoorbeeld precies 3596 v.Chr. en door dat hout eveneens met ^{14}C te dateren, hebben we een ijkpunt: we weten dan wat de ^{14}C -concentratie in de atmosfeer is geweest, in dat betreffende jaar. Zo weten we de klepel van onze vreemd tikkende klok te hangen. Met behulp van de dendrochronologie is een ijkgrafiek gemaakt die momenteel 12.400 jaren teruggaat⁵.

We weten nu, bijvoorbeeld, dat 10.000 ^{14}C jaren geleden, overeenkomt met 12.000 echte jaren geleden: een verschil van 2.000 jaar, veroorzaakt doordat er in die tijd ongeveer 20% meer ^{14}C in de atmosfeer aanwezig was.

Zo weten we ook dat midden in het eerste millennium v.Chr. ^{14}C beperkt bruikbaar is: tussen 800 en 400 v.Chr., gedurende 400 kalenderjaren dus, verandert de ^{14}C -klok nauwelijks. Dat is een probleem voor de klassieke archeologie. Andersom kan ook: het lijkt er op dat rond 40.000 jaar geleden 5.000 ^{14}C -jaren overeenkomen met slechts één echt millennium (1.000 kalenderjaren). Zo wordt met ^{14}C ook een ander licht geworpen op de uitspraak "waar blijft de tijd".

Voorbij de "boomgrens" van ruim 12.000 jaar moeten we echter vooralsnog onze toevlucht nemen tot andere gegevens dan jaarringen.

Recent (nog geen jaar geleden) is de ijkgrafiek uitgebreid tot 26.000 jaar geleden met behulp van marine gegevens: koralen, gedateerd met zowel ^{14}C als Uranium-isotopen, en schelpjes uit gelaagde afzettingen uit de zeebodem. Deze gegevens zijn tegen het licht gehouden door onze ^{14}C -ijkwerkgroep en zijn betrouwbaar gevonden, betrouwbaar genoeg voor ijkdoeleinden⁶.

Daarnaast zijn er recentelijk in bijna schrikbarend tempo andere gegevens beschikbaar gekomen, sommige daarvan beslaan het gehele ^{14}C -meetbereik van 50.000 jaar. Met enige trots kan ik melden dat ons Groninger laboratorium dit als eerste voor elkaar heeft gekregen. In een meer in Japan is een afzetting gevonden met jaargelaagdheid, zodat we ook daar de jaren kunnen aftellen. Dit fungeert als absolute tijdschaal, analoog aan de boomringen. Uit dit sediment zijn takjes, blaadjes, insecten en dergelijke verzameld – een minutieus werk maar daar zijn onze Japanse collega's erg goed in. Met onze deeltjesversneller hebben we ongeveer 350 metingen verricht en zo de eerste "ijkgrafiek" (tussen aanhalingstekens) voor het Paleolithicum verkregen, althans het ^{14}C -gedeelte daarvan⁷.

"Ijkgrafiek" tussen aanhalingstekens, want later kwamen meer van dergelijke grafieken beschikbaar, gemeten aan andere natuurlijke archieven. En, u raadt het wellicht al, ze wijken onderling nogal van elkaar af, en dat kan natuurlijk niet als we het over ijking hebben. Op zijn minst één van de records is dus onjuist, wellicht allemaal tot op zekere hoogte. Elk van deze records heeft namelijk zo zijn problemen of aannames, wat precies het verschil is met de ijking gebaseerd op jaarringen. Om bij ons Japanse meersediment te blijven, een punt van kritiek is dat er mogelijk stukken sediment - en dus tijd - ontbreken, de zogenaamde hiaten. Het gaat te ver om hier in detail de pros en cons van elk gegevensbestand te behandelen, maar duidelijk is dat

dit alles valt onder het hoofdstuk “werk in uitvoering”. Deze onderlinge discrepantie kan oplopen tot enkele duizenden jaren, en is de reden dat voorbij de aanbevolen ijking tot 26.000, nog géén ijkgrafiek kan worden aanbevolen.

De ijkgrafiek tot 26.000 jaar geleden bestaat uit een dataset welke INTCAL04 is genoemd. Van het oudere gedeelte ben ik de onofficiële zegsman geworden omdat ik me de laatste jaren nogal wetenschappelijk druk heb gemaakt over onjuist gebruik van ijkgegevens door gebruikers van ^{14}C . Voor de archeologie hebben we het dan over het tijdperk van de mammoet en andere megafauna, en de overgangsfase van de Neandertaler naar de moderne mens. Het betreffende artikel, eveneens eind vorig jaar gepubliceerd in ons vakblad *Radiocarbon*, is dan ook NOTCAL04 genoemd⁸ - dit in tegenstelling tot INTCAL04, de aanbevolen ijking tot 26.000.

Ik ben benieuwd wat de citatie-index van een dergelijke titel zal zijn bij de volgende onderzoeksvisitatie. INTCAL98, de vorige ijkserie die een stuk minder ver in de tijd terug ging⁹, is inmiddels het meest geciteerde artikel in enkele disciplines. Van INTCAL04 verwachten we nog meer. De citatiescore ligt al weer vast voor de rest van het lopende decennium. Het verbaast u niet dat het aantal auteurs inmiddels is uitgebreid van 10 in 1998 naar 29 nu, en evenmin dat we er moeite mee hadden ons nog meer kandidaat mede-auteurs van het lijf te houden.

Eén en ander illustreert wat mij betreft de betrekkelijkheid van het tellen van artikelen en citatie-indexen. Het gaat in dit geval eigenlijk om data en computer-programma's die iedereen gebruiken wil, ja zelfs moet. Ja, dan gaat het snel. Kortom, een vertekend beeld, al is dit niet bepaald in ons nadeel.

Het beleid is tegenwoordig alles te meten en vast te leggen in ranglijsten. Dat is op zich niet verkeerd; immers, het adagium “meten is weten” is per definitie ingebakken in wetenschappen zoals die waarin ik ben opgeleid. Maar cijfers zijn niet alleenzalmakend, er zijn ook nog zaken zoals interpretatie, meetfouten, onvolledigheid en wijsheid.

Een vergelijkbare kanttekening dient gemaakt te worden bij universitaire ranglijsten. Zo waren er krantenberichten eind 2004 dat Leiden de slechtste universiteit van Nederland zou zijn¹⁰. Deze berichten verschenen een aantal dagen na mijn benoeming, maar ik ben zo eigenwijs om te denken dat tussen deze beide zaken geen oorzaaklijk verband bestaat.

Enkele maanden later lees ik over de zorg van mijn eigen Groningse universiteit omdat we gezakt zijn op de zgn. Shanghai-lijst van prestigieuze universiteiten wereldwijd, en wel van 84^e in 2003 tot 139^e in 2004¹¹. Volgens mij is er toch echt niet zoveel veranderd in dat ene jaar. De fout in dit soort getallen is blijkbaar in de orde van 50% of meer.

Deze constatering betreffende meten, weten, foutenmarges en wijsheid wordt enigszins gespiegeld door de combinatie ^{14}C en archeologie in de Levant.

Voor het Midden-Oosten is erg veel bekend, denk aan hiëroglfen, kleitabletten etcetera. Chronologieën zijn al ongeveer een eeuw geleden geconstrueerd; voor ^{14}C is traditioneel gezien geen of weinig ruimte omdat 1^e) er veel vast lag toen de ^{14}C -methode volwassen werd in de jaren '60 van de vorige eeuw, en 2^e) de nu nog openstaande vragen veelal een tijdplossend vermogen vergen waar ^{14}C niet nauwkeurig genoeg voor is of was.

Zo zijn van de provincie Groningen meer ^{14}C -dateringen bekend dan van heel Egypte.

Op zich is dat niet onlogisch, maar er zijn nieuwe ontwikkelingen. In de eerste plaats is ^{14}C er op vooruitgegaan: de meetmethode met de versneller opende nieuwe mogelijkheden, maar vooral de mogelijkheid tot preciese ijking van de tijdschaal is hier van belang. Wat blijkt: hier en daar duiken significante problemen op.

Zo blijkt dat de vroegste dynastieën van Egypte 300 jaar eerder in de tijd moeten worden geplaatst, althans volgens ^{14}C ¹².

Hoge-precisiedateringen van Jericho (Israël) van de bronstijd geven ook resultaten 2 à 3 eeuwen ouder dan de archeologische traditie¹³. Deze dateringen zijn van belang vanwege mogelijk verband met de uitbarsting van de Thera of Santorini-vulkaan in de Egeïsche zee. Deze uitbarsting representeert een goed gedefinieerde gebeurtenis, in jargon een " ^{14}C event" en is van belang voor de synchronisatie van chronologieën, en kalenders van de toenmalige beschaaftde wereld. Natuurwetenschap (waaronder ^{14}C) en Egyptologie staan hier op gespannen voet - de koningslijsten zijn 1 à 2 eeuwen jonger¹⁴.

We moeten natuurlijk vooral niet als een bèta-olifant door de alfa-porseleinkast vol aardewerk gaan stampen, maar de geconstateerde problemen moeten wel onder ogen worden gezien. Als historische en ^{14}C -chronologieën van elkaar afwijken, is op zijn minst één van beiden onjuist, en kunnen we wat van elkaar leren.

Een zeer actueel chronologisch probleem met als onderwerp "vroeger of later" in de Levant is de ijzertijd-discussie in Israël. Een nieuwe stelling, recent ingenomen is dat de chronologie van de 10^e eeuw v.Chr. naar de jongere tijd moet opschuiven met een kleine eeuw. Het gaat hier om niets meer of minder dan de tijd van het bestaan van een verenigd koninkrijk in Israël onder David en Salomo¹⁵. Van het bestaan van deze koningen hebben we alleen weet via de Bijbel; wetenschappelijk is er echter niets bekend betreffende dit koninkrijk. Bij een lage (jongere) chronologie is er geen tijdruimte voor dit koninkrijk; bij een hoge (oudere) chronologie is die tijdruimte er wel. U begrijpt, dat wordt al gauw een lelijke discussie. In het tijdschrift *Science*, niet bepaald het minste medium, treft men uitspraken aan¹⁶ als "revisionistische wetenschappers", "bijbelse minimalisten", "esoterische archeologie", en "armageddon voor de bijbelse archeologie". Dit laatste is de mooiste als u weet dat de lage chronologie met name gebaseerd is op onderzoek aan Tel Megiddo.

Tot mijn niet geringe verbazing speelde deze discussie zich vrijwel geheel af met chronologieën gebaseerd op aardewerk. ^{14}C speelde nauwelijks een rol; er waren een paar dateringen beschikbaar maar het geheel was niet goed genoeg om het pleit te beslechten.

ten, terwijl die potentie er wel degelijk is. Overigens zijn ook de aardewerk-deskundigen verdeeld in voor- en tegenstanders van een herziening van de chronologie. Een Salomons-oordeel leek nodig.

U voelt hem al aankomen: wij hebben dit aangepakt met ^{14}C middels een daarvoor geschikte site: Tel Rehov. Op deze Tel wordt al jaren opgegraven door collega's van de Hebreeuwse Universiteit van Jeruzalem. Er is een zeer duidelijke stratigrafie, met daarin zowel goed gedefinieerd aardewerk als veel geschikt materiaal voor ^{14}C . Het onderzoek was niet gemakkelijk: een tijdsresolutie van slechts enkele tientallen jaren is vereist. Streng kwaliteitscontrole, inzet van beide beschikbare ^{14}C -meettechnieken, geselecteerd monstermateriaal, de stratigrafie en een unieke set van 65 dateringen waren uiteindelijk nodig. Het onderste is in de loop van het project uit de kast gehaald.

De verdere details zal ik u besparen, maar het resultaat is: de voorgestelde herziening naar een verkorte chronologie is onjuist, althans volgens onze metingen¹⁷. David en Salomo keren terug in de geschiedenis, volgens de krantenkoppen¹⁸. In elk geval is hun bestaan wat tijdruimte betreft weer (of nog steeds) mogelijk.

De conclusie van dit alles: de ^{14}C -methode is niet alleenzalmakend en heeft ook zo zijn beperkingen, maar het is wel een meting van de tijd, onafhankelijk van cultuur-historische gezichtspunten en associaties.

In dit verband is door gezaghebbende auteurs het woord "revolutie" gebruikt aangaande de introductie van ^{14}C in de archeologie¹⁹; we staan nog steeds op de drempel van de impact van twee cruciale ontwikkelingen, namelijk het gebruik van precieze ijkgrafieken, en de introductie van AMS²⁰.

AMS (Accelerator Mass Spectrometry), dat is de techniek van het ^{14}C meten met deeltjesversnellers. Het gaat hierbij om massaspectrometrie en dat betekent kleine monsters, in tegenstelling tot de oorspronkelijke methode, de radiometrie. Daar zijn grammen koolstof voor nodig, en aangezien de ^{14}C -methode destructief is (het monster wordt feitelijk opgestookt) is dit vaak bezwaarlijk. Voor AMS daarentegen is slechts één milligram nodig, een factor 1000 minder dus, wat veel nieuwe en vaak spectaculaire ontwikkelingen heeft opgeleverd in alle disciplines van toepassing, dus ook in de archeologie. Zoals na een interview kernachtig is samengevat in een reformatorische krant: dateren met een korreltje²¹.

Zonder AMS géén ^{14}C -dateringen van veenlijken, lijkwades, de ijsmummie, zaden, pollen en andere botanische resten, oude teksten, kostbare collecties, schelpjes uit de diepzee, gecremeerd bot, ^{14}C in ijs en atmosferische sporengassen, ijkgrafieken voorbij de dendrochronologie, archeologische vondsten van de bodem van de Noordzee, en Neandertalers.

Sinds 1994 heeft het Groninger ^{14}C -laboratorium de beschikking over zo'n deeltjesversneller, ter complementering van het oude en vertrouwde radiometrische laboratorium. Ter complementering zeg ik met nadruk, niet ter vervanging: de conventionele

opstelling is uniek wat betreft de meetnauwkeurigheid, en uitermate betrouwbaar. Slechts met de inzet van beide faciliteiten is het mogelijk speciale chronologische projecten uit te voeren, zoals het eerder vermelde in Israël²².

Dit alles had niemand kunnen voorzien in de pioniertijd van ^{14}C , ruim 50 jaar geleden. We mogen er vanuit gaan dat ook wij nu niet kunnen voorzien hoe over 50 jaar ^{14}C wordt gemeten. Wie weet lopen we dan op de opgraving rond met een on-line ^{14}C -snuffelaar (en daarmee bedoel ik niet onze hoofdanalist).

Mijn meest gedenkwaardige moment met de AMS? Dat was merkwaardigerwijs niet het moment dat de eerste ^{14}C -deeltjes werden waargenomen, of de acceptatie van een mooie publicatie. Nee het was het moment dat ik naar de directeur beheer van onze faculteit toog voor de bestelling van één versneller. Met een gewone universitaire bestelbon, ik zie het getal met 6 nullen exclusief BTW nog voor mij, het hokje "reeds telefonisch besteld" aangekruist, het hokje "reeds gehaald door" maar niet.

niet-terrestrische monsters en stabiele isotopen

De ^{14}C -dateringsmethode wordt in de archeologie voornamelijk toegepast op terrestrische monsters: hout, houtskool, veen, bot, enzovoorts.

Bij niet-terrestrische monsters treedt een bijzonder verschijnsel op. Een schelp bijvoorbeeld, gisteren nog levend aangespoeld op het Noordzeestrand, blijkt 400 jaar oud te zijn. Deze "schijnbare ouderdom" is een gevolg van het zogenaamde reservoir-effect: het verschil voor wat betreft ^{14}C tussen de atmosfeer enerzijds, en anderzijds de oceaan of rivieren.

Door opwelling van oud diepzeewater bevat het oppervlaktewater minder ^{14}C , en wel ongeveer 5%, wat overeenkomt met 400 jaar. Schelpen halen hun koolstof uit dit water en lijken daardoor 400 jaar te oud.

Zoetwaterreservoirs (rivieren en meren) zijn ook verarmd in ^{14}C , maar dat wordt veroorzaakt door menging met grondwater. Dit grondwater bevat opgeloste fossiele kalk, die erg oud is en dus geen ^{14}C meer bevat. Een (verse) vis uit de Rijn kan zo een ^{14}C -ouderdom van wel 2.000 jaar hebben. Het record-reservoir-effect staat bij mijn weten op naam van waterplanten uit IJsland, aangetroffen in vulkanisch water. Levende planten leveren een ^{14}C -datering van ruim 8.000 jaar op²³.

Het effect treedt ook op bij zoogdieren die alleen vis eten, zoals ijsberen en zeehonden. Dit is aangetoond door dergelijke dieren met een bekende sterfdatum met ^{14}C te dateren; ze zijn dan 400 jaar "te oud"²⁴. Dit geldt ook voor mensen. Een Eskimo, overleden in 1750, is volgens ^{14}C 600 jaar geleden overleden. In Nederland staat het reservoir-effect ook wel bekend als het "vis-effect". Het meest beroemde (of beruchte) geval voor Nederland betreft de graven van het Hollandse huis, destijds opgegraven in de abdijkerk te Rijnsburg. Het skelet, toegeschreven aan Floris V (overleden in 1296)

gaf een te oude datering. Prof. Mook heeft in zijn oratie destijds in 1977 er al op gewezen dat er sprake kan zijn van een vis-effect²⁵. Overigens is onder historici inmiddels ook om andere redenen twijfel ontstaan over de vraag of het geanalyseerde botmateriaal wel van Floris is. Over de dateringen worden nu nog steeds vragen gesteld. Ik red me daar doorgaans uit door uit te leggen dat de metingen zijn verricht in 1962, toen ik nog op de lagere school zat en dus moeilijk verantwoordelijk kan worden gehouden voor de ontstane situatie.

Voor Nederland hebben we de effecten van het reservoir-effect op dateringen verder in kaart proberen te brengen door het op betrekkelijk grote schaal dateren van botmateriaal van middeleeuwse heiligen en edelen. Waarom deze categorie: hiervan is de sterfdatum bekend, zodat het verschil met de ^{14}C -datering rechtstreeks de grootte van het vis-effect oplevert. Inderdaad is er een verouderingseffect waargenomen, variërend tussen de 100 en 400 jaar²⁶.

Het meest fraaie bewijs voor het reservoir-effect is afkomstig uit de midden-steentijd. Van een gewapend treffen in de Balkan tijdens het Mesolithicum (ca. 7.000 jaar geleden; toen ook al) is een gesneuvelde man opgegraven met in zijn heup een pijlpunt, gemaakt van een bot van een (niet nader geïdentificeerd) hoefdier. Wat blijkt uit de ^{14}C -dateringen: het menselijk bot is enkele eeuwen ouder dan het daarin stekende dierlijke pijlpunt-bot. De opgegraven nederzetting ligt aan de Donau, dus visconsumptie door de betreffende mens is ook hier zeer waarschijnlijk²⁷.

Eén en ander is volledig in overeenstemming met metingen van stabiele isotopen in hetzelfde bot, waar we in dit verhaal inmiddels bij zijn aangeland.

Gedurende het laatste decennium is er namelijk een geheel nieuwe tak van sport ontstaan: onderzoek naar het paleodiet (wat mensen en dieren hebben gegeten in het verleden) met behulp van stabiele isotopen in archeologisch botmateriaal.

Ik vertelde al eerder over fractionering: planten bevatten minder isotopen zoals ^{13}C en ^{14}C dan de atmosfeer waarin ze groeien, door massa-afhankelijke effecten bij de fotosynthese.

Iets vergelijkbaars geldt voor de botten in ons lichaam: ^{13}C in archeologisch botmateriaal is een indicator voor het dieet van mens of dier waartoe het bot ooit heeft behoord.

Een klassiek voorbeeld hiervan in de literatuur betreft de introductie van de landbouw in Amerika in de tijd vóór Columbus. In de eerste eeuwen van onze jaartelling verandert de ^{13}C -concentratie in botten van prehistorische indianen met meer dan 1% (en dat is veel in het isotopenvak), van een waarde normaal voor jagers / verzamelaars naar een waarde, zeer specifiek voor maïseters, dus landbouwers²⁸.

Dieren en mensen breken hun voedsel af in kleinere componenten, om daar weer nieuwe complexe bouwstoffen mee samen te stellen. Bijvoorbeeld hun skelet, belangrijk omdat in de archeologie bot vaak het enige materiaal is dat is overgebleven van een dier of mens. Hierbij treedt opnieuw fractionering op. Als we uitgaan van plan-

teneters, wordt hierbij de verarming in ^{13}C – ontstaan in de plant door de fotosynthese – voor een klein gedeelte weer tenietgedaan. Dit zelfde geldt voor dieren die plantteneters eten (vleeseters dus), en zo verder voor elke stap in de voedselketen. Een analoog proces treedt op voor andere isotopen, waarvan ik hier alleen het stabiele isotoop van het element stikstof noem – stikstof-15 (^{15}N).

De stabiele isotopen ^{13}C en ^{15}N in een tweedimensionale figuur tegen elkaar uitgezet, laten groepen zien specifiek voor diersoorten, veroorzaakt door hun positie in de voedselketen. Ik kan het verschil niet zien tussen een eland en een mammoet als we het over skeletresten hebben, maar met de isotopengetallen kom ik een heel eind. Wat is hiervan nu het belang voor de archeologie: afwijkende of veranderende stabiele isotopenconcentraties in het verleden reflecteren een verandering in het paleodiet, en daarmee in bijvoorbeeld de vegetatiesamenstelling door klimaatschommelingen, of migraties. Een speerpunt van dergelijk onderzoek dezer dagen is bijvoorbeeld het wel en wee van mammoeten en andere megafauna gedurende de laatste ijstijd²⁹.

Dit geldt niet alleen voor dieren zoals de mammoet, maar ook voor de mens. Uiteindelijk leidt dit alles tot de gevleugelde uitspraak “u bent wat u eet”. Deze uitspraak staat niet alleen in de damesbladen maar kunt u ook letterlijk aantreffen als de titel van een gezaghebbend artikel in een meer gerenommeerd tijdschrift als *Science*³⁰. Ik noem hier slechts een enkel spraakmakend voorbeeld van de vele, die in de literatuur beschikbaar zijn gekomen, met name de laatste paar jaar.

Analyse van ^{13}C en ^{15}N aan botten van Neandertalers uit Kroatië en België laat zien dat men toen geen vegetarisch dieet volgde; het waren vleeseters dus blijkbaar jagers. Wie verbaast zich daar eigenlijk nog over gezien de populaire beeldvorming^{31,32}.

Voor het beroemde Çatalhöyük in het huidige Turkije, waar veel skeletten onder de huizen zijn gevonden, is zelfs een poging gedaan om via ^{15}N uit mannelijke en vrouwelijke botten te onderzoeken of de cultuur matriarchaal was (landbouw-gericht) of patriarchaal (jagers), via dieetreconstructie. De uitslag betreffende deze bijzondere toepassing van isotopendiscriminatie was helaas niet duidelijk³³.

Voor een opgraving in Schotland werkte dit wel: mannelijk skeletmateriaal correspondeert volgens de stabiele isotopen ^{13}C en ^{15}N met een steviger marien dieet dan het vrouwelijk skeletmateriaal³⁴. Een archeologische verklaring ontbreekt echter tot nog toe. Stof tot nadenken, zullen we maar zeggen.

Een ander voorbeeld met een politieke lading: het Westfries Museum had een probleem doordat menselijk skeletmateriaal werd opgeëist door de Groenlandse regering, omdat men dacht dat het ging om een Inuit. Het skelet is onderzocht, onder andere met behulp van stabiele isotopen. De ^{13}C en ^{15}N waarden bleken absoluut niet overeen te komen met een marien dieet. De betreffende persoon kan dan ook geen oorspronkelijke Groenlander zijn geweest³⁵.

Wat betreft ^{14}C -dateringen en dieet, vertelde ik al eerder over het viseffect. Een belangrijke vraag is hoe groot dit effect is, en of we daarvoor de ^{14}C -datering kunnen

corrigeren. Helaas is dat niet altijd mogelijk, zoals bijvoorbeeld het geval is bij "Trijntje", met ongeveer 7500 jaar de oudste vrouw van Nederland, gevonden bij de Leidse opgraving nabij Hardinxveld-Giessendam³⁶.

De ^{14}C -datering is wat aan de oude kant, gebaseerd op de archeologische verwachting, en waarschijnlijk is hier inderdaad sprake van het viseffect.

Alleen voor een puur mariene omgeving is correctie mogelijk met behulp van ^{13}C ; bijvoorbeeld bij opgegraven vikingen op Groenland is dit gedaan³⁷. Voor alleen rivier-vis als dieet kan met behulp van ^{15}N worden gecorrigeerd; dit is onder andere met succes toegepast bij het eerder genoemde slachtoffer met een pijl in zijn heup. Voor de Lage Landen echter hebben we te maken met een complex menggebied waarbij allerlei combinaties mogelijk zijn, en waarvoor dus geen éénduidige correctie voor de ^{14}C -datering vastgesteld kan worden.

Ook het grote Russische gebied is opengegaan het afgelopen decennium, niet alleen voor ^{14}C -dateringen van allerlei interessants, maar ook voor het bestaan van het viseffect dat daar niet bekend is en hiaten in de chronologieën kan verklaren. Direct na mijn aanstelling hier kreeg ik al een bepaalde naam doordat een Russische archeologe een tasje met vis had meegegeven aan een Leidse collega, dat hier in de postkamer op mij stond te wachten. Tot ieders verbijstering zat onderin het tasje een envelop met 500 dollar ter bekostiging van de metingen. Een nieuwe creatieve vorm van financiering van ons onderzoek, wat je noemt boter bij de vis. Geld stinkt niet, zeggen ze, maar ik kan u verzekeren: deze biljetten deden dat wel.

de toekomst van het verleden

Isotopen en archeologie tezamen blijven boeiend, dat staat vast. Ook in de komende jaren kunnen we ervan uitgaan dat er nieuwe, spannende en verrassende zaken aan de orde zullen komen. Ik noem er een aantal.

In Tell Sabi Abyad, Syrië, is bij archeologisch onderzoek van collega prof. Akkermans³⁸ een mogelijk verband gevonden tussen cultuurverandering in het Neolithicum ongeveer 6000 v.Chr., en een klimaatverandering. Dit laatste is de beroemde zgn. 8k2 event: een drastische klimaatverandering waargenomen eerst in ijskernen, later in veel meer klimaatbestanden op het noordelijk halfrond. Dit wordt zelfs wel een mini-ijstijd genoemd³⁹, met onder andere als gevolg droogte in de Levant. Dit nodigt gewoon uit tot een nieuw project omvattende natuurlijke isotopen en preciese dateringen van de betreffende archeologische en klimatologische gebeurtenissen.

Verder zal het misschien mogelijk blijken om monsters ouder dan 50.000 jaar te dateren met behulp van isotopenverrijking. Het is een oud idee dat mogelijkkerwijs terugkomt in een nieuwe vorm, bedacht door collega prof. Meijer. Als dat lukt, en dat

is nog maar de vraag gezien de moeilijkheidsgraad, volgt vrijwel automatisch voor de archeologie een nieuwe essentiële bijdrage aan de kennis over het Paleolithicum, althans wat betreft chronologische kwesties.

Nieuwe projecten in het uitgebreide Rusland, maar ook dichterbij op de bodem van de Noordzee leveren met de regelmaat van de klok nieuw archeologisch materiaal op, variërend van uniek gereedschap tot botten van uitgestorven dieren zoals de mammoet. Wat betreft isotopen is er nog veel onontgonnen terrein; zowel degene die zijn genoemd (^{13}C , ^{14}C en ^{15}N) als enkele die ik niet heb genoemd zoals de stabiele isotopen van zuurstof en waterstof (^{18}O en ^2H) in fossiel bot en haar, en isotopen van het element Strontium (Sr) die op de Vrije Universiteit kunnen worden gemeten. Gezamenlijk kunnen deze ingezet worden ter verkrijging van meer inzichten in zaken zoals ouderdom, dieet, klimaat, en migraties. Er is nog veel te doen, niet alleen op isotopengebied maar ook voor de archeometrie in het algemeen. Ik denk aan nieuwe initiatieven vanuit de Faculteit der Archeologie hier, zoals samenwerking met de TU Delft in de vorm van CAAS (Centre of Arts and Archaeological Sciences), en het onderzoek naar oud DNA. Het verleden heeft zeker nog toekomst!

Tot slot, voor het laatste nieuws van groot belang voor de archeologie in het algemeen, gaan we weer even terug naar de koningin van de natuurlijke isotopen, ^{14}C . In Zuid-Frankrijk, in de Ardèche, is in 1994 een grot ontdekt met prachtige paleolitische schilderijen: Chauvet. De schilderijen hebben nogal de aandacht getrokken, niet alleen omdat ze onverstoorde zijn aangetroffen en ontroerend mooi zijn, maar ook omdat ze zo oud zijn, ca. 30.000 jaar.

De ouderdom van deze schilderijen wordt hier en daar betwijfeld, er moet ongeveer de helft af volgens archeologen, deskundig op het gebied van grotschilderingen⁴⁰. Er is kritiek uitgeoefend op het Franse ^{14}C -laboratorium dat de dateringen heeft uitgevoerd, reden waarom het houtskool waarvan de schilderijen zijn gemaakt, en dat in grote hoeveelheden in de grot op de bodem voor het grijpen ligt, opnieuw wordt gedateerd door andere laboratoria, waaronder Groningen. Ik mocht zelf de monsters nemen zodat ik me een bevoorrecht persoon voel, de grot is namelijk niet zomaar toegankelijk.

Een punt van kritiek betrof gedetailleerd onderzoek naar mogelijke verontreinigingen, dat is nu gedaan. Het resultaat: de datering blijft 30.000 jaar.

Daarnaast is het in de grot druk met hollenberen, er liggen ongeveer 200 skeletten van dieren die in hun winterslaap hier zijn overleden. In afzonderlijke projecten, onafhankelijk van het onderzoek naar de schilderijen, is een aantal hollenberen gedateerd. Sommige schilderijen in de grot zijn bekrast door een beer. We weten niet welke beer zijn handtekening heeft achtergelaten, maar de gedateerde beren blijken ook allemaal rond de 30.000 jaar oud te zijn.

Kortom de sensationele ouderdom blijft gewoon staan, wat ^{14}C betreft.

dankwoord

Gekomen aan het einde van mijn oratie, wil ik een woord van dank uitspreken. Allereerst aan de leiding van de Faculteit der Archeologie, in het bijzonder betuig ik mijn dank aan de hooggeleerde heren Louwe Kooijmans, Jansen en Van Kolfschoten. Beste Leendert, Maarten en Thijs: jullie zien het belang in van de rol die de natuurwetenschappen voor de archeologie kunnen spelen. Dat ik mede een inhoudelijke bijdrage mag geven aan deze rol beschouw ik als eervol.

Het Leids Universiteits Fonds en het College van Bestuur dank ik voor de bevestiging van de voordracht.

Ik bedank de collega's van het Centrum voor Isotopen Onderzoek in Groningen. Allereerst prof. Mook die mij destijds heeft ingehuurd, en zijn opvolger prof. Meijer die ik op mijn beurt weer heb ingehuurd. Beste Wim, beste Harro: ik ben jullie erkentelijk voor het creëren en instandhouden van een eersteklas wetenschappelijke omgeving waarin veel mogelijk is.

Daarnaast - en zeker niet in de laatste plaats - de analisten en technici: ik reis de wereld rond en houd mooie verhalen, maar zonder jullie inzet en toewijding is dat niet mogelijk. Met zijn allen weten wij een isotopenlab in bedrijf te houden met naast een fantastische wetenschappelijke output, een financiële omzet van meer dan 5 euro-ton per jaar voor onze universiteit, dat mag ook wel eens in het openbaar worden genoemd.

Mijn promotor, prof. van der Woude, wil ik hier ook graag noemen. Beste Adriaan, experimenteren met complexe apparatuur en een kritische houding aangaande meetresultaten heb ik onder jouw leiding geleerd, en die ervaringen ben ik nu, 25 jaar later, zeker niet vergeten.

Mijn ouders ben ik erkentelijk omdat zij mij altijd hebben gestimuleerd om zo ver mogelijk door te leren, en dat ik hier nu sta is daar een hoogtepunt van.

Tot slot ben ik dankbaar voor de steun van mijn thuisfront.

Mijn eerste vrouw Tjallie is er niet meer maar ik wil haar hier memoreren; zij is destijds met mijn carrière meegegaan inclusief de bijbehorende verhuizing naar de Verenigde Staten, het was niet altijd even gemakkelijk.

Mijn huidige partner Marijke wil ik hier bedanken voor je onvoorwaardelijke steun in goede en minder goede dagen. Ik mag nog vaker afwezig zijn voor mijn werk, wat de afstand Leiden-Groningen nu eenmaal met zich meebrengt. Wat wil je nog meer. Een snelle treinverbinding met het noorden wellicht, maar dat zal ik vermoedelijk niet meer meemaken.

Ik heb gezegd.

Literatuur

1. J.C.Vogel, 1980. Fractionation of the carbon isotopes during photosynthesis. Springer Verlag.
2. H. de Vries, 1958. Variation in concentration of radiocarbon with time and location on earth. Proceedings Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen B61, 1-9.
3. G. Bond, B. Kromer, J. Beer, R. Muscheler, M.N. Evans, W. Showers, S. Hoffmann, R. Lotti-Bond, I. Hajdas and Bonani, 2001. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science* 294, 2130-2136.
4. B. van Geel, J. van der Plicht, M.R. Kilian, E.R. Klaver, J.H.M. Kouwenberg, H. Renssen, I. Reynaud-Farrera and H.T. Waterbolk, 1998. The sharp rise of ^{14}C ca. 800 cal BC: possible causes, related climatic connections and the impact on human environments. *Radiocarbon* 40, 535-550.
5. M. Friedrich, S. Remmele, B. Kromer, J. Hofman, M. Spurk, K.F. Kaiser, C. Orcel and M. Küppers, 2004. The 12.460 year Hohenheim oak and pine tree-ring chronology from central Europe - a unique annual record for Radiocarbon calibration and paleoenvironment reconstructions. *Radiocarbon* 46, 1111-1122.
6. P.J. Reimer, M.G.L. Baillie, E. Bard, A. Bayliss, J.W. Beck, C.J.H. Bertrand, P.G. Blackwell, C.E. Buck, G.S. Burr, K.B. Cutler, P.E. Damon, R.L. Edwards, R.G. Fairbanks, M. Friedrich, T.P. Guilderson, A.G. Hogg, K.A. Hughen, B. Kromer, F.G. McCormac, S. Manning, C. Bronk Ramsey, R.W. Reimer, S. Remmele, J.R. Southon, M. Stuiver, S. Talamo, F.W. Taylor, J. van der Plicht and C.E. Weyhenmeyer, 2004. INTCAL04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0-26 cal kyr BP. *Radiocarbon* 46, 1029-1058.
7. H. Kitagawa and J. van der Plicht, 1998. Atmospheric radiocarbon calibration to 45,000 yr BP: late glacial fluctuations and cosmogenic isotope production. *Science* 279, 1187-1190.
8. J. van der Plicht, J.W. Beck, E. Bard, M.G.L. Baillie, P.G. Blackwell, C.E. Buck, M. Friedrich, T.P. Guilderson, K.A. Hughen, B. Kromer, F.G. McCormac, C. Bronk Ramsey, P.J. Reimer, R.W. Reimer, S. Remmele, D.A. Richards, J.R. Southon, M. Stuiver and C.E. Weyhenmeyer, 2004. NOTCAL04: comparison / calibration ^{14}C records 26-50 cal kyr BP. *Radiocarbon* 46, 1225-1238.

9. M. Stuiver, P.J. Reimer, E. Bard, J.W. Beck, G.S. Burr, K.A. Hughen, B. Kromer, G. McCormac, J. van der Plicht and M. Spurk, 1998. INTCAL98 Radiocarbon Age Calibration. Radiocarbon 40, 1041-1083.
10. Dagblad Trouw, 10 september 2005.
11. Rijksuniversiteit Groningen. Strategisch Plan RUG 2003-2010, voorjaar 2005.
12. H.J. Bruins and J. van der Plicht, 2001. Radiocarbon challenges Archaeo-Historical time frameworks in the Near East: the Early Bronze Age of Jericho in relation to Egypt. Radiocarbon 43, 1321-1332.
13. H.J. Bruins and J. van der Plicht, 1996. The Exodus enigma. Nature 382, 213-214.
14. S.W. Manning, 1999. A test of time: the volcano of Thera and the chronology and history of the Aegean and East Mediterranean in the mid second millennium BC. Oxbow Books.
15. I. Finkelstein and N.A. Silberman, 2002. The Bible unearthed: archaeology's new vision of ancient Israel and the origin of its sacred texts. Simon and Schuster.
16. M. Balter, 2000. News focus: Archaeology in the Holy Land. Science 287, 28-35.
17. H.J. Bruins, J. van der Plicht and A. Mazar, 2003. ^{14}C dates from Tel Rehov: Iron Age Chronology, Pharaohs and Hebrew Kings. Science 300, 315-318.
18. Dagblad Trouw, 12 april 2003.
19. C. Renfrew, 1999. Before civilization - the radiocarbon revolution and prehistoric Europe. Pimlico.
20. O. Bar-Yosef, 2000. The impact of Radiocarbon dating on old world archaeology: past achievements and future expectations. Radiocarbon 42, 23-29.
21. Reformatorisch Dagblad, 7 juni 1994.
22. J. van der Plicht and H.J. Bruins, 2006. Quality control of Groningen ^{14}C results from Tel Rehov: repeatability and intercomparison of Proportional Gas Counting and AMS. In: Radiocarbon dating and the Iron Age of the Southern Levant: the Bible and Archaeology today. T.E. Levy and T. Higham (eds). Equinox Publishing (in press).

23. A.E. Sveinbjörnsdóttir, J. Heinemeijer, N. Rud and S.J. Johnsen, 1992. Radiocarbon anomalies observed for plants growing in Icelandic geothermal waters. *Radiocarbon* 34, 696-703.
24. H. Tauber, 1979. ^{14}C activity of arctic marine mammals. In: R. Berger and H.E. Suess (eds.), *Radiocarbon dating*. University of California Press, 447-452.
25. W.G. Mook, 1977. *Isotopologie*. Oratie, Rijksuniversiteit Groningen.
26. J.N. Lanting en J. van der Plicht, 1995/1996. Wat hebben Floris V, skelet Swifterbant en visotters gemeen? *Palaeohistoria* 37/38, 491-519.
27. G.T. Cook, C. Bonsali, R.E.M. Hedges, K. McSweeney, V. Boroneant, L. Bartosiewicz and P.B. Pettitt, 2002. Problems of dating human bones from the Iron Gates. *Antiquity* 76, 77-85.
28. N.J. van der Merwe and J.C. Vogel, 1978. ^{13}C content of human collagen as a measure of prehistoric diet in Woodland North America. *Nature* 276, 815-816.
29. H. Bocherens, 2003. Isotopic biogeochemistry and the palaeoecology of the mammoth steppe fauna. *Deinsea* 9, 57-73.
30. M.J. Kohn, 1999. You are what you eat. *Science* 283, 335-336.
31. H. Bocherens, D. Billiou, A. Mariotti, M. Toussaint, M. Patou-Mathis, D. Bonjean and M. Otte, 2001. New isotopic evidence for dietary habits of Neandertals from Belgium. *Journal of Human Evolution* 40, 497-505.
32. M.P. Richards, P.B. Pettitt, M.C. Stiner and E. Trinkaus, 2001. Stable isotope evidence for increasing dietary breadth in the European mid-Upper Palaeolithic. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98, 6528-6532.
33. I. Hodder, 2004. Women and man at Catalhöyük. *Scientific American* 290, 67-73.
34. M.P. Richards, B.T. Fuller and T.I. Molleson, 2005. Stable isotope palaeodietary study of humans and fauna from the multi-period (Iron Age, Viking and Late Medieval) site of Newark Bay, Orkney. *Journal of Archaeological Science* (in press).
35. *Arctica*, Bulletin Arctic Peoples Alert nr.11, zomer 2001, pag.5.

36. L.P. Louwe Kooijmans (red.), 2001. Hardinxveld-Giessendam Polderweg, een mesolithisch jachtkamp in het rivierengebied (5500-5000 v.Chr.). Rapportage Archeologische Monumentenzorg 83.
37. J. Arneborg, J. Heinemeier, N. Lynnerup, H.L. Nielsen, N. Rud and A.E. Sveinbjörnsdottir, 1999. Change of diet of the Greenland vikings determined from stable carbon isotope analysis and the ^{14}C dating of their bones. Radiocarbon 41, 157-168.
38. P.M.M.G. Akkermans, 2004. Het einde van de oude wereld en het begin van de nieuwe tijd. Oratie, Universiteit Leiden.
39. B. Fagan, 2004. The long summer - how climate change changed civilization. Granta Books.
40. P. Pettitt and P. Bahn, 2003. Current problems in dating Palaeolithic cave art: Candamo and Chauvet. Antiquity 77, 142-145.